

DOI: 10.17117/nv.2015.02.032

Поступила (Received): 28.05.2015

<http://ucom.ru/doc/nv.2015.02.032.pdf>

mirea@mirea.ru

**Капустин В.И., Ли И.П., Свитов В.И.,
Шуманов А.В., Турбина А.В., Захаров А.К.
Электронная структура оксидной фазы
металлопористых и «скандатных»
катодов СВЧ приборов**

**Kapustin V.I., Lee I.P., Svitov V.I.,
Shumanov A.V., Turbina A.V., Zakharov A.K.
Electronic Structure of Metal-porous and
"Scandate" MW-devices Cathodes**

Методами спектроскопии оптического поглощения и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов исследована структура электронных уровней кислородных вакансий и электронная концентрация в оксиде бария, являющегося основным эмиссионно-активным компонентом металлопористых и «скандатных» катодов СВЧ приборов. Проведена расшифровка спектров ХПЭЭ для металлопористого и «скандатного» катодов. Рассчитаны значения электронных концентраций в оксиде бария для металлопористого и «скандатного» катодов. Результаты расчета концентрации кислородных вакансий показывают, что после пропитки вольфрамовой матрицы оксидной фазой концентрация кислородных вакансий в «скандатном» катоде в 1,62 раза меньше, чем в металлопористом катоде. Это связано с большей термической устойчивостью скандата бария по сравнению с алюминатом. Исследована электронная структура стандартного металлопористого катода и «скандатного» катода и установлены два фактора влияния скандия на улучшения эмиссионных свойств «скандатного» катода по сравнению с металлопористым катодом. Это может позволить сформулировать физико-химическую модель работы «скандатного» катода, которая отсутствовала в литературе на протяжении 40 лет после его изобретения

Ключевые слова: металлопористые катоды, электронная концентрация в оксиде

Methods of optical absorption spectroscopy and characteristic electron energy losses spectroscopy is applied for the structure of the electronic levels of the oxygen vacancy and electron concentration in the oxide of barium investigation, which is the main emission-active component of porous metal and "scandate" cathodes for microwave devices. The decoding of the EEL spectra for porous metal and "scandate" cathodes is carried out. The values of electron concentrations in barium oxide for porous metal and "scandate" cathodes are calculated. The results of the calculation show that for impregnated tungsten matrix oxide phase oxygen vacancies concentration in "scandate" cathode is 1.62 times less than in porous metal cathode. This is due to higher thermal stability of barium scandate in comparison with the aluminate. Electronic structure of standard porous metal and "scandate" cathode investigated shows two factors of influence of scandium on the improvement of emission properties "scandate" cathode compared to porous metal cathode. This may allow to formulate a physical and chemical model of "scandate" cathode functioning, which is still absent for 40 years after its invention

Key words: porous metal cathodes, electron concentration in the oxide

Капустин Владимир Иванович

Доктор физико-математических наук, профессор
Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники и
информационных технологий
Москва, пр. Вернадского, 78

Ли Илларион Павлович

Кандидат технических наук, начальник центра
Научно-технический центр «Базовые технологии
ЭВП» ОАО «Плутон»
Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, 11

Свитов Владислав Иванович

Кандидат химических наук, доцент
Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники и
информационных технологий
Москва, пр. Вернадского, 78

Шуманов Алексей Владимирович

Начальник лаборатории
Научно-технический центр «Базовые технологии
ЭВП» ОАО «Плутон»
Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, 11

Турбина Анна Владимировна

Инженер
Научно-технический центр «Базовые технологии
ЭВП» ОАО «Плутон»
Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, 11

Захаров Анатолий Кузьмич

Кандидат технических наук, доцент
Московский государственный технический
университет радиотехники, электроники и
информационных технологий
Москва, пр. Вернадского, 78

Kapustin Vladimir Ivanovich

Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor
Moscow State Technical University of
Radioengineering, Electronics and Information
Technologies
Moscow, Vernadsky ave. 78

Lee Illarion Pavlovich

Candidate of Engineering Sciences, Chief of Centre
Science-technical centre "EVD Basic Technologies" at
open joint stock company "Pluton"
Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st., 11

Svitov Vladislav Ivanovich

Candidate of Chemical Sciences, associate Professor
Moscow State Technical University of
Radioengineering, Electronics and Information
Technologies
Moscow, Vernadsky ave. 78

Shumanov Alexey Vladimirovich

Head of laboratory
Science-technical centre "EVD Basic Technologies" at
open joint stock company "Pluton"
Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st., 11

Turbina Anna Vladimirovna

Engineer
Science-technical centre "EVD Basic Technologies" at
open joint stock company "Pluton"
Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st., 11

Zakharov Anatolij Kuzmich

Candidate of Engineering Sciences, associate
Professor
Moscow State Technical University of
Radioengineering, Electronics and Information
Technologies
Moscow, Vernadsky ave. 78

Введение (Introduction)

В настоящее время при производстве электровакуумных СВЧ приборов на многих предприятиях электронной промышленности, в том числе в ОАО «Плутон», применяют металлопористые катоды на основе вольфрамовой губки, пропитанной алюминатом бария-кальция. В литературе имеется множество публикаций о свойствах так называемых «скандатных» катодов [1-2], которые при тех же температурах обеспечивают получение на серийных катодах плотности тока до 100–150 А/см². Типичный «скандатный» катод также выполнен на основе вольфрамовой губки, пропитанной алюминатом бария-кальция, содержащим дополнительно 4–5% оксида скандия.

Известно, что ионы кальция, алюминия, скандия, вольфрама в оксиде бария в макроколичествах не растворяются. Данные о пределах растворимости

указанных элементов в оксиде бария в литературе отсутствуют. Поэтому эмиссионные свойства и металлопористого, и «скандатного» катодного материалов будут определяться эмиссионными свойствами оксида бария, на которые влияют микроколичества легирующих элементов (Ca, Al, Sc, W) в объеме и в приповерхностной области зерен, а также отклонение состава оксида бария от стехиометрического соотношения [3-4]. Эти же факторы существенно влияют на спектральные свойства материала в оптическом диапазоне электромагнитного излучения.

При анализе эффекта влияния состава материала на эмиссионные свойства импрегнированного катода целесообразно использовать комплексный подход с параллельным использованием методов оптической и электронной спектроскопии.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию особенностей электронной структуры оксида бария в с целью оценки распределения дефектов решетки, определяющих эмиссионные характеристики материалов термокатоде.

Материалы и методы (Materials and Methods)

На рис. 1 приведена энергетическая диаграмма оксида бария, содержащего только кислородные вакансии [4-5].

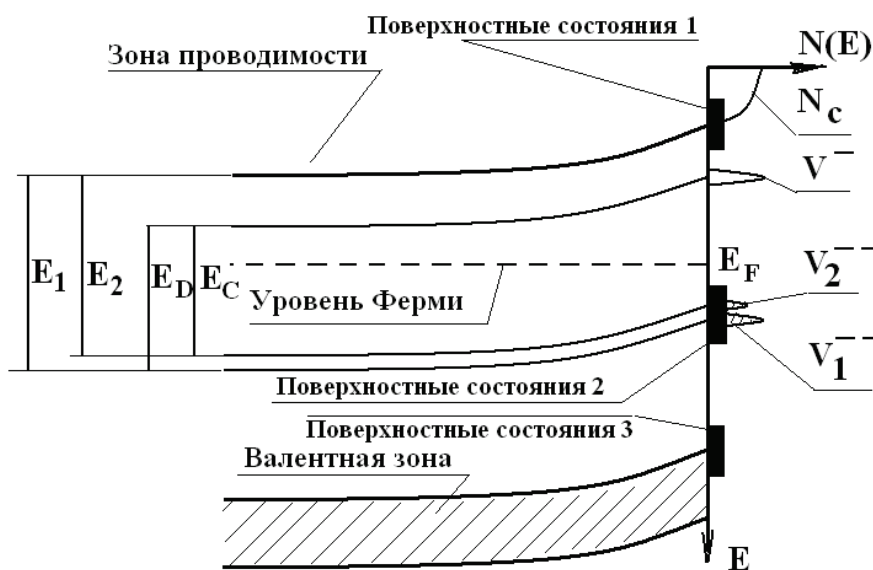


Рис. 1. Энергетическая схема верхних электронных зон оксида бария:
 1 – собственные поверхностные состояния акцепторного типа,
 3 – собственные поверхностные состояния донорного типа, 2 – поверхностные состояния кислородных вакансий акцепторного типа. N_c – плотность состояний в зоне проводимости, V_1^- и V_2^- – плотности состояний двухзарядной кислородной вакансии, соответственно, в нижней и верхней подзонах,
 V^- – плотность состояний однозарядной кислородной вакансии,
 E_F – уровень Ферми, E_1 , E_2 , E_D и E_C – энергии переходов между соответствующими электронными уровнями

Известно [6-7], что кислородные вакансии формируют в зонной структуре оксида бария донорные уровни двухзарядных и однозарядных вакансий. При этом значение эффективного заряда вакансий в общем случае может быть меньше соответствующих целочисленных значений. Расщепление электронного уровня обусловлено неупорядоченным распределением двухзарядных кислородных вакансий и атомов легирующих элементов: вольфрама, кальция, алюминия, скандия – в оксиде бария [4, 8]. В табл. 1 приведена схема влияния различных факторов на значение работы выхода и ряд других параметров электронной структуры оксида бария.

Таблица 1. Характер влияния дефектов на электронную структуру BaO

Тип дефекта	Объем			Поверхность		
	Тип уровня	Уровень Ферми	Работа выхода	Тип уровня	Изгиб зон у поверхности	Работа выхода
Кислородная вакансия	Донорный	Резко поднимается	Резко понижается	Акцепторный	Зона изгибается вверх	Немного повышается
Вакансия атомов бария	Акцепторный	Резко «понижается»	Резко повышается	Донорный	Зона изгибается вниз	Немного понижается
Дефект замещения иона Ba ионом Al, W или Os	Акцепторный, частично компенсирует донорные	Понижается незначительно	Повышается незначительно	Донорный, как за счет вакансий ионов Ba, так и за счет ионов примеси	Изгиб зоны вверх уменьшается	Снижается с уменьшением изгиба зоны вверх

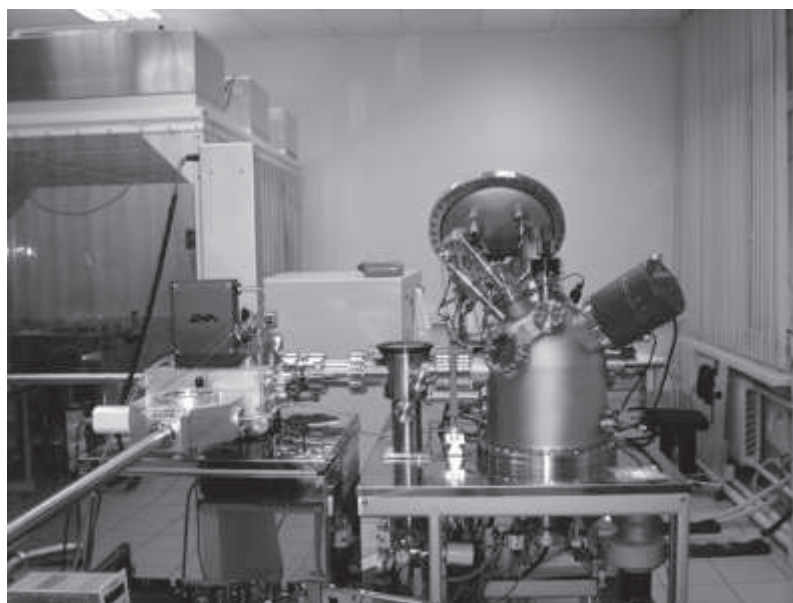


Рис. 2. Внешний вид электронного спектрометра высокого разрешения

Электронная структура уровней кислородных вакансий в оксиде бария исследовалась путем регистрации оптического поглощения экспериментальных образцов материалов в диапазоне длин волн 600–1100 нм с использованием оптического спектрометра T-70+ (UV/VIS) фирмы PG Instruments Ltd. Шаг при развертке спектров составлял 0,5 нм, эффективная ширина щели – 5 нм.

При исследовании электронной концентрации в оксидной фазе катодных материалов методом характеристических потерь энергии электронов был использован электронный спектрометр высокого разрешения (рис. 2). Спектрометр оснащен электронным анализатором высокого разрешения типа сферического зеркала, источником рентгеновского излучения, электронными пушками нескольких типов и позволяет проводить исследования материалов методами Оже-спектроскопии, электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА) и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (ХПЭЭ).

Технология приготовления образцов для оптической спектроскопии была следующей. В качестве исходных компонентов были использованы компоненты, входящие в состав металлопористых и оксидных катодов: карбонаты бария, кальция, стронция, оксиды алюминия и скандия, а также порошок вольфрама. Порошки были смешаны в молярных пропорциях, в пересчете на чистые оксиды. После тщательного перемешивания компонентов образцы материалов помещались в молибденовые лодочки с алунированным молибденовым вкладышем на никелевых пластинах и спекались «насыпью» в вакууме при температуре 1200 °С в течение 2 ч. Затем спеки были раздроблены в ступке, взяты расчетные навески, из которых прессовались таблетки диаметром 6,6 мм и толщиной 1 мм.

В качестве образцов для исследования спектров ХПЭЭ были использованы образцы стандартного металлопористого катода, в котором вольфрамовая губка пропитывалась оксидной фазой состава $2,5\text{BaO} \cdot 0,4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а также модельного металлопористого «скандатного» катода, в котором вольфрамовая губка пропитывалась оксидной фазой состава $2,5\text{BaO} \cdot 0,4\text{CaO} \cdot \text{Sc}_2\text{O}_3$. Температура синтеза оксидных фаз из карбонатов бария-кальция, оксида алюминия и оксида скандия составляла 1450 °С, режим пропитки вольфрамовой губки – 1850 °С в течение 4 мин.

Результаты (Results)

Оптическое поглощение в образцах материалов

Поглощение света в оптической среде, энергетическая диаграмма которой представлена на рис. 1, можно представить в виде:

$$I_{tr} = I_0 \exp \left\{ -x \left[\sum \alpha_i (\text{OH}^-) + \alpha(R) + \alpha(IR) + \alpha(E_1) + \alpha(E_2) + \alpha(E_C) + \alpha(E_D) \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь I_{tr} – интенсивность прошедшего излучения, x – толщина образца, $\alpha_i(\text{OH}^-)$ – коэффициенты поглощения света на трех модах колебаний гидроксильных групп, $\alpha(R)$ – коэффициент рэлеевского рассеяния света, $\alpha(IR)$ – коэффициент поглощения инфракрасного излучения, $\alpha(E_1)$, $\alpha(E_2)$, $\alpha(E_C)$, $\alpha(E_D)$ – коэффициенты поглощения при электронных переходах, обозначенных на рис. 1.

При этом аналитические выражения для рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения хорошо известны [9].

На рис. 3 в качестве примера приведен спектр поглощения образца оксида бария, очищенный от шумов, из которого вычтены спектры рэлеевского и инфракрасного поглощения [5].

Пики *A*, *B* и *E* относятся к поглощению на гидроксильных группах в BaO, пики *C* и *D* соответствуют переходам, показанным на рис. 1. Отношение площадей пиков *C* и *D* позволяет определить эффективный заряд двухзарядной кислородной вакансии [5], а расстояние Δ между максимумами пиков *C* и *D* – значение эффективной массы электронов на двухзарядной кислородной вакансии. Действительно, в соответствии с [10] относительная эффективная масса электронов m^*/m может быть приближенно представлена в виде

$$\frac{m^*}{m} \approx \frac{mU_g}{\pi^2 \hbar^2 g^2}, \tag{2}$$

где m – масса электрона, g – волновой вектор электрона на границе зоны Бриллюэна, \hbar – постоянная Планка, U_g – возмущающая случайная потенциальная энергия взаимодействия между кислородными вакансиями, приводящая к расщеплению их уровней. При этом величина $g = \pi/a$, где a – параметр кристаллической решетки оксида бария, а величину U_g приближенно можно принять равной $U_g = \Delta/4$.

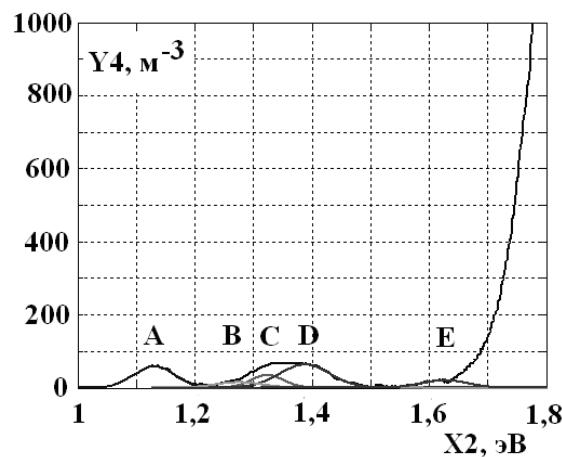


Рис. 3. Спектр поглощения оксида бария после вычитания спектров рэлеевского и инфракрасного поглощения

Значения параметров электронной структуры в соответствии с рис. 1, в том числе эффективной массы электронов двухзарядной кислородной вакансии и эффективного заряда кислородной вакансии для образцов составов BaO + (0,1Al₂O₃ и BaO) + 0,1Sc₂O₃ приведены в табл. 2. Так как содержание оксида кальция в оксидной фазе стандартного и модельного металлопористого катода мало, то эти же значения указанных выше параметров в первом приближении можно отнести и к катодным материалам на основе оксидных фаз 2,5BaO·0,4CaO·Al₂O₃ и 2,5BaO·0,4CaO·Sc₂O₃.

Таблица 3. Параметры электронной структуры металлопористого и «скандатного» катодов

Параметр	Катод с оксидной фазой 2,5BaO·0,4CaO·Al ₂ O ₃	Катод с оксидной фазой 2,5BaO·0,4CaO·Sc ₂ O ₃
Эффективный заряд вакансии e^* , отн. ед.	1,66	1,46
Расщепление зоны Δ , мэВ	62	25
Эффективная масса m^*/m , отн. ед.	$6,43 \cdot 10^{-4}$	$2,59 \cdot 10^{-4}$
«Глубина» уровня кислородной вакансии $\Delta E_v = (E_1 + E_2)/2$, эВ	1,78	1,78
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	4,71	4,63
$\Delta E_{об.}$, эВ	9,90	10,77
$\Delta E_{пов.}$, эВ	7,07	7,80
$N_{об.}$, М ⁻³	$6,02 \cdot 10^{25}$	$6,12 \cdot 10^{25}$
$N_{пов.}$, М ⁻³	$3,72 \cdot 10^{25}$	$3,90 \cdot 10^{25}$
Объемная концентрация вакансий C_1 , %	1,01	0,63

Характеристические потери энергии электронов

После синтеза материала основной оксидной фазой в металлопористом катоде является сложный оксид состава 3BaO·Al₂O₃, устойчивый до температуры 1750 °С, а в «скандатном» катоде – сложный оксид состава 3BaO·Sc₂O₃, устойчивый до 2050 °С. На этапе пропитки вольфрамовой губки и на следующем этапе активирования катода происходит образование кристаллов оксида бария в результате взаимодействия алюминатов или скандатов бария с вольфрамом. Прямое разложение алюминатов или скандатов на оксиды бария и алюминия или скандия невозможно из-за термодинамических ограничений, а выделение оксида бария в результате взаимодействия алюминатов или скандатов с вольфрамом связано с летучестью оксида вольфрама. При этом «унос» кислорода из оксида бария оксидом вольфрама и обуславливает формирование в оксиде бария кислородных вакансий, ответственных за его термоэмиссионные свойства. Условно уравнение данной реакции, с учетом типа диаграммы состояния «BaO–Al₂O₃», можно записать в виде



где значение x определяет отклонение оксида бария от стехиометрии, а испарение оксида вольфрама сдвигает равновесие реакции (3) вправо.

На рис. 4 приведен спектр ХПЭЭ для металлопористого катода на основе оксидной фазы 2,5BaO·0,4CaO·Al₂O₃ при энергии первичных электронов 1005 эВ.

Для повышения чувствительности при выделении характеристических потерь применяется дифференцирование исходного сигнала, так что по оси u приведена первая производная кривой потерь вторичных электронов по энергии $dN(E)/dE$. Пики характеристических потерь выделены путем разложения спектра на гауссовы компоненты, сумма их площадей равна площади полного спектра.

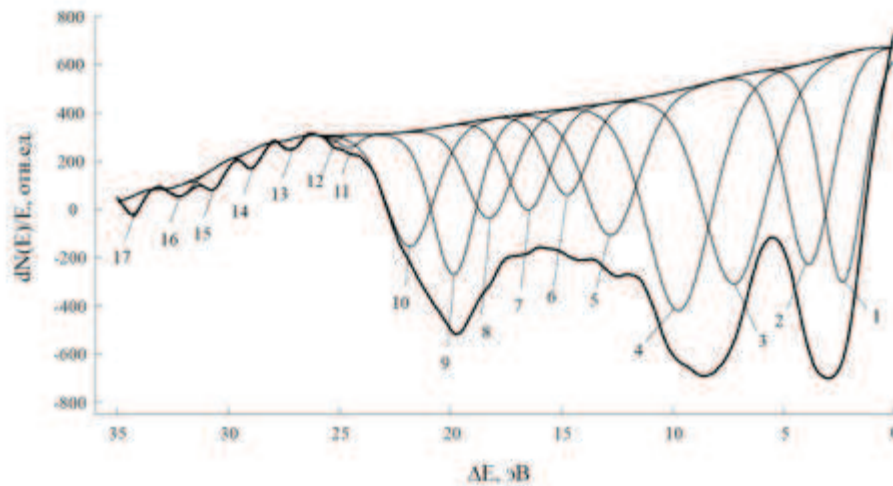


Рис. 4. Спектр характеристических потерь энергии электронов в металлопористом катоде $W+2,5BaO \cdot 0,4CaO \cdot Al_2O_3$

Так как нестехиометричный оксид бария, содержащий кислородные вакансии, является полупроводником донорного типа, а остальные оксидные фазы в катодном материале – диэлектрики, то характеристические потери в катодном материале обусловлены возбуждением объемных и поверхностных плазмонов, энергии которых, соответственно E_V и E_S , определяются известными выражениями [11]:

$$E_V = \sqrt{\frac{e^{*2} N_V}{\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \tag{4}$$

$$E_S = \sqrt{\frac{e^{*2} N_s}{2\epsilon \epsilon_0 m^*}}, \tag{5}$$

где e^* – эффективный заряд кислородной вакансии, m^* – эффективная масса электронов кислородных вакансий, \hbar – постоянная Планка, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, $\epsilon = 3,6$ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость оксида бария, N_V – объемная концентрация кислородных вакансий, N_s – поверхностная концентрация кислородных вакансий. Кроме того, потери могут быть обусловлены и межзонным возбуждением, например, с уровня кислородной вакансии или из валентной зоны в зону проводимости. При этом следует учитывать, что ниже дна зоны проводимости имеются экситонные состояния с энергией возбуждения экситонов примерно равной $0,25n$ эВ, где n – целое число, причем нижнее экситонное состояние лежит выше верха валентной зоны примерно на 4,0 эВ [12]. Таким образом, полные потери ΔE на возбуждение плазмонных колебаний можно представить в виде

$$\Delta E = n_1 E_V + n_2 E_S, \tag{6}$$

где n_1 и n_2 – целые числа.

В табл. 3 для примера приведена схема расшифровки некоторых пиков спектра ХПЭЭ для металлопористого катода. Пик 1, на наш взгляд, соответствует потерям на возбуждение электронов с уровня кислородных вакансий в зону про-

водимости с одновременным возбуждением экситона. Пик 2 – потерям на возбуждение электронов из валентной зоны в нижнее экситонное состояние ниже дна зоны проводимости. Остальные пики табл. 2 хорошо описываются пятью рядами в соответствии с соотношением (6) в виде линейных зависимостей.

Таблица 3. Таблица расшифровки спектра ХПЭЭ в металлопористом катоде

№ пика	ΔE , эВ	Ряд:	1	2	3	4	5
1	2,0		$0E_{пов}$	$0E_{об}$			
2	4,0				$0E_{пов} + E_g$		
3	7,2		$1E_{пов}$				$E_{пов} + 0E_{об}$
4	9,7			$1E_{об}$		$0E_{пов} + E_{об}$	
9	19,8			$2E_{об}$			

Аналогичная расшифровка спектра была проведена и для «скандатного» катода. Рассчитанные в соответствии с соотношениями (4) и (5) значения электронных концентраций в оксиде бария для металлопористого и «скандатного» катодов представлены в табл. 2.

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

Расщепление электронного уровня кислородных вакансий определяется двумя факторами:

- неупорядоченным пространственным распределением собственно кислородных вакансий в оксиде бария, что приводит к появлению возмущающей случайной потенциальной энергии взаимодействия между кислородными вакансиями;

- взаимодействием между электронными состояниями примесных атомов алюминия или скандия с электронными состояниями кислородных вакансий.

Результаты расчета концентрации кислородных вакансий, приведенные в табл. 2, показывают, что после пропитки вольфрамовой матрицы оксидной фазой концентрация кислородных вакансий в «скандатном» катоде в 1,62 раза меньше, чем в металлопористом катоде. Это связано, как уже отмечалось выше, с большей термической устойчивостью скандата бария по сравнению с алюминатом. А это означает, что и на этапе пропитки катодов, и на этапе их активирования, которое также протекает в соответствии с реакцией (3), концентрация кислородных вакансий, а значит и эмиссионная способность «полностью скандатного» катода, будут ниже, чем у металлопористого катода. В свете данного обстоятельства становится понятна и экспериментально подобранная в литературе схема выбора состава «скандатного» катода, содержащего 95% алюминатной фазы и примерно 5% – скандатной.

Методами спектроскопии оптического поглощения и характеристических потерь энергии электронов исследована электронная структура стандартного металлопористого катода и «скандатного» катода и установлены два фактора влияния скандия на улучшения эмиссионных свойств «скандатного» катода по сравнению с металлопористым катодом. Это может позволить сформулировать физико-химическую модель работы «скандатного» катода, которая отсутствовала в литературе на протяжении 40 лет после его изобретения.

Список используемых источников:

1. Schoenbeck Laura. Investigation of reactions between barium compounds and tungsten in a simulated reservoir hollow cathode environment. // In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science in Materials Science and Engineering. Georgia Institute of Technology, February 2005. 118 p.
2. Gartner G., Geintter P., Ritz A. Emission properties of top-layer scandate cathodes prepared by LAD. // Appl. Surf. Sci. 1997. No 111. P. 11-17.
3. Капустин В.И. Расчет температурной зависимости работы выхода окиси бария. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1991. Т. 55, № 12. С. 2455-2458.
4. Капустин В.И. Физико-химические основы создания многокомпонентных оксидсодержащих катодных материалов. // Перспективные материалы. 2000. № 2. С. 5-17.
5. Ли И.П., Капустин В.И., Свитов В.И. и др. Структура электронных уровней кислородных вакансий в оксиде бария. // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. Вып. 2(525). 2015. С. 45-58.
6. Zalm P. Thermionic cathodes. // Adv. In Electronics and El. Phys. Acad. Press. N.Y.-Lon. 1968. v. 25. P. 211-272.
7. Никонов Б.П., Бейнар К.С. Термоэлектронная эмиссия оксидного катода в потоке бария. // Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15, № 6. С. 1272-1282.
8. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. Пер. с англ. М.: Мир. 1974. 472 с.
9. Янг М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы. Пер. с англ. М.: Мир. 2005. 541 с.
10. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1975. 584 с.
11. Шульман А.Р., Фридрихов С.А. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. М.: Наука. 1977. 552 с.
12. Лазарев В.Б., Соболев В.В., Шаплыгин И.С. Химические и физические свойства простых оксидов металлов. М.: Наука. 1983. 240 с.

References:

1. Schoenbeck Laura. Investigation of reactions between barium compounds and tungsten in a simulated reservoir hollow cathode environment. In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science in Materials Science and Engineering. Georgia Institute of Technology, February 2005. 118 p.
2. Gartner G., Geintter P., Ritz A. Emission properties of top-layer scandate cathodes prepared by LAD. Appl. Surf. Sci. 1997. No 111. P. 11-17.
3. Kapustin V.I. Calculations of Work Function Temperature Dependence for Barium Oxide. Izv. USSR Academy of Sciences. Phys. 1991. V. 55. No 12. P. 2455-2458.
4. Kapustin V.I. Physico-chemical bases of multicomponent oxide materials creation for cathodes. Advanced materials. 2000. No 2. P. 5-17.
5. Lee I.P., Kapustin V.I., Svitov V.I., et al. The structure of the electronic levels of the oxygen vacancies in barium oxide. Electronic Engineering. Series 1: MW Engineering. Issue. 2(525). 2015. P. 45-58.
6. Zalm P. Thermionic cathodes. Adv. In Electronics and El. Phys. Acad. Press. N.Y.-Lon. 1968. Vol. 25. P. 211-272.
7. Nikonov B.P., Beynar K.S. Thermionic Emission from Oxide Cathode in Barium Flow. Radioengineering & Electronics. 1970. V. 15, No 6. P. 1272-1282.
8. Mott N.F., Davis E.A.. Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. Clarendon-Press, Oxford. 1971. 437 p.
9. Young M. Optics and Lasers. Including Fibers and Optical Waveguides. Springer-Verlag. 2001. 511 p.
10. Kireev P.S. Semiconductor Physics. M.: Higher School. 1975. 584 p.
11. Shulman A.R., Fridrikhov S.A. Secondary emission methods of solids investigation. M.: Science. 1977. 552 p.
12. Lazarev V.B., Sobolev V.V., Shaplygin I.S. Chemical and physical properties of simple metal oxides. M.: Science. 1983. 240 p.